B 3108 D

Funkschau

MIT FERNSEH-TECHNIK, SCHALLPLATTE UND TONBAND

TELEFUNKEN *Sonderdruck*

TELE FUN KEN

WALTER BRUCH: FARBFERNSEH-SYSTEME

Sonderdruck aus FUNKSCHAU Nr. 23, 1. Dezember-Heft 1964
Franzis-Verlag München

Die Diskussion über Farbfernsehsysteme

gewinnt im Hinblick auf die angestrebte einheitliche Lösung der Farbfernsehübertragungen in Europa zunehmend an Bedeutung. Veröffentlichungen in der Fachpresse und Vorträge über die Technik der zur Wahl stehenden Systeme und Systemvarianten NTSC, PAL und SECAM dienen in erster Linie dazu, die Fachleute in den Postverwaltungen, Rundfunkgesellschaften und Industrieunternehmen über noch laufende Entwicklungsarbeiten und über die Ergebnisse der in den europäischen Ländern angestellten sorgfältigen Verfahrenserprobungen zu unterrichten.

Der komplizierten Farbfernsehtechnik gemäß, setzt das Studium der bisher vorliegenden Fachveröffentlichungen große Sachkenntnis und eine gründliche Beschäftigung mit den Einzelproblemen des Farbfernsehens voraus. Da andererseits über die internationale Gruppe der Experten hinaus das Thema Farbfernsehen weite Kreise interessiert, haben wir das Angebot der „Funkschau", einen einführenden Überblick über die diskutierten Systeme zu veröffentlichen, dankbar angenommen.

Der Leiter unserer Fernseh-Grundlagenentwicklung, Walter Bruch, der das von unserem Unternehmen mit zur Wahl gestellte Farbfernsehverfahren PAL (Phase Alternation Line) entwickelt hat, stellte den Aufsatz „Farbfernsehsysteme: NTSC, PAL, SECAM", veröffentlicht in der „Funkschau" Nr. 23/1964, zur Verfügung. In seinem Beitrag hat Walter Bruch, der zahlreichen deutschen und internationalen Fachkommissionen angehört, versucht, objektiv die spezifischen Eigenschaften der drei genannten Verfahren darzustellen.

Wir überreichen Ihnen diesen Sonderdruck für Ihr eigenes Studium der Farbfernsehtechnik und hoffen, Ihnen damit auch einen Eindruck von den vorteilhaften Eigenschaften des PAL-Verfahrens vermitteln zu können.

TELEFUNKEN
Aktiengesellschaft

Farbfernseh-Systeme: NTSC, PAL, SECAM

Das Farbfernsehen rückt näher, und es ist die rechte Zeit für den Praktiker, sich mit der wahrhaftig nicht unkomplizierten Technik der Farbfernseh-Übertragung vertraut zu machen. Walter Bruch – „Vater" des PAL-Systems – hat es übernommen, den Lesern der FUNK-SCHAU die drei heute zur Debatte stehenden Verfahren in einer Weise zu beschreiben, die klar erkennen läßt, daß sie enge Verwandte sind – oder, genau gesagt: SECAM und PAL sind fortschrittliche Varianten des amerikanischen NTSC-Systems, wobei PAL ganz offensichtlich einige vorteilhafte Besonderheiten hat. Auf diese weist der Verfasser nachdrücklich hin.

Die Aufgabe eines Farbfernseh-Übertragungssystems, das Aussicht auf allgemeine Einführung haben soll, besteht darin, zusammen mit den normalen Schwarzweiß-Signalen auch die zusätzlichen Farbinformationen übertragen zu können, ohne daß hierzu eine Vergrößerung der augenblicklich bestehenden Übertragungsbandbreiten erforderlich wäre. Gleichzeitig muß die Bedingung gestellt werden, daß ein aus Schwarzweiß- und Farbinformationen bestehendes Signal auch von einem bisher üblichen Fernsehgerät empfangen und als Schwarzweiß-Bild wiedergegeben werden kann. Dabei darf es nicht von den gleichzeitig mit übertragenen Farbsignalen störend beeinflußt werden *(Kompatibilität)*. Ebenso soll ein Farbempfänger auch ein Schwarzweiß-Bild – also ein Signal ohne Farbinformation – in guter Qualität darstellen können *(Rekompatibilität)*.

Sowohl Kompatibilität als auch Rekompatibilität gehören somit zu den wichtigsten Voraussetzungen für das Farbfernsehen. Sie zu erfüllen, ist außerordentlich schwierig. Aus diesem Grunde – unter anderen – ist es bis heute noch nicht endgültig entschieden, nach welchem Verfahren künftig Farbfernsehbilder innerhalb Europas vom Studio bis zum Fernsehempfänger übertragen werden sollen. Es wurde zwar in den Jahren 1950 bis 1953 in den USA von allen maßgebenden amerikanischen Industriefirmen im National Television System Commitee (NTSC) in enger Gemeinschaftsarbeit ein Farbfernseh-System entwickelt, das inzwischen sowohl in den USA als auch in Japan eingeführt ist. Dessen Farbübertragung kann aber leider von bestimmten, meist nicht zu vermeidenden Fehlern der Übertragungsstrecke leicht verfälscht werden, so daß eine individuelle Farbtoneinstellung am Empfänger erforderlich ist. Da das NTSC-Verfahren aber ohnehin für Europa – hauptsächlich wegen der unterschiedlichen Kanalbreiten gegenüber der in Amerika festgelegten – nicht ohne weiteres übernommen werden kann und auch die veränderte Zeilen- und Bildwechselzahl (525 Zeilen/60 Hz in den USA; 625 Zeilen/50 Hz in Europa) den direkten Empfang amerikanischer Signale nicht möglich macht, wurde man in Europa ermutigt, nach einem neuen System zu suchen. Es sollte natürlich die guten Eigenschaften des NTSC-Verfahrens möglichst ohne Einschränkung übernehmen, sich aber in bezug auf die Stabilität der Farbübertragung den besonderen europäischen Anforderungen anpassen. Dafür wurde von H. de France das *Secam*-System (*Séquentiel à mémoire*) vorgeschlagen, und es wurden ferner erfolgversprechende Versuche mit dem vom Verfasser in den Telefunken-Labors entwickelten PAL-Verfahren (Phase Alternation Line) vorgenommen.

Im folgenden sollen die Funktionen der einzelnen Systeme beschrieben und die durch Versuchsreihen gewonnenen Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Der Autor ist Leiter des Telefunken-Grundlagen-Labors in Hannover.

NTSC-System

Bekanntlich kann eine normale Schwarzweiß-Zeichnung oder -Fotografie mit einem relativ groben Buntstift ausreichend gut koloriert werden. Der Beschauer wird dieses Bild dann nicht weniger scharf empfinden als das ursprüngliche Schwarzweiß-Bild, denn die Detailauflösung des gesamten Bildes ist im wesentlichen nur von der Schwarzweiß-Zeichnung abhängig. Überträgt man diese Erkenntnis auf ein Farbfernseh-Übertragungsverfahren, so kommt man zu dem Ergebnis, daß es genügt, ein normales breitbandiges Schwarzweiß-Signal zusätzlich mit relativ schmalbandigen Farbsignalen zu kolorieren.

Ferner soll als bekannt vorausgesetzt werden, daß jede für den praktischen Gebrauch ausreichende Farbart durch Mischung von drei *Primärfarben* darzustellen ist. Dieses in der Dreifarben-Fotografie und beim farbigen Druck für die Wiedergabe von Farbbildern prinzipiell angewendete Verfahren wird deshalb auch für das Farbfernsehen benutzt.

Aus dem zu übertragenden Bild werden zunächst drei Farbauszüge, und zwar Rot, Grün und Blau gemacht. Hierzu benötigt man in der Aufnahmekamera drei Aufnahmeröhren, vor die entsprechende optische Filter gesetzt sind *(Bild 1)*. Im Studio können die drei so gewonnenen Farb-Videosignale direkt auf eine Farbröhre mit drei Strahlsystemen gegeben werden, wie dies symbolisch durch drei Farbbildröhren, deren Bilder durch sogenannte dichroische Spiegel zu einem vereinigt werden, in Bild 1 dargestellt ist. (In Japan wird neuerdings genau nach dem dargestellten Prinzip der drei Farbbildröhren ein normaler Farbempfänger angeboten.)

Ehe die drei Signale aber auf die Bildröhre gegeben bzw. zu dem sogenannten Leuchtdichtesignal U_Y vereinigt werden, müssen sie noch einer Vorverzerrung unterworfen werden, mit der die Nichtlinearität der Bildröhrenkennlinie kompensiert wird. Die Leuchtdichte z. B. der sogenannten „Roten Kanone" einer Bildröhre bzw. deren Strahlstrom folgt dem Gesetz (siehe nächste Seite):

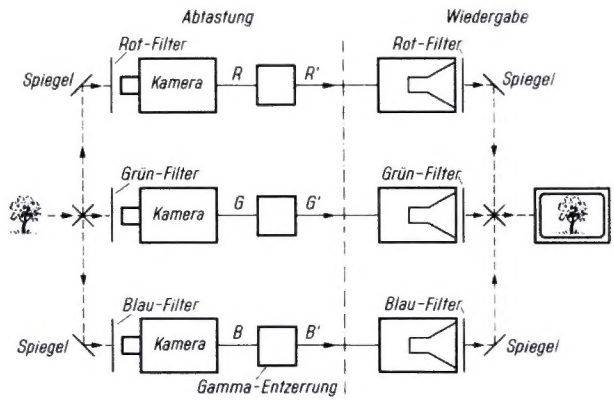
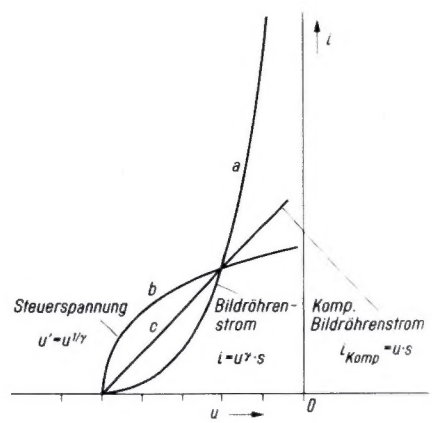


Bild 1. Grundprinzip des Farbfernsehens. Aus drei Kameraröhren, vor denen Filter liegen, welche zu jeder Röhre nur einen bestimmten Farbtonbereich durchlassen, werden die drei Farbvideosignale R, G und B gewonnen und weitergeleitet



Unten: Bild 2. Gammaentzerrung. Strahlstrom (und Helligkeit) einer Bildröhrenkanone sind nicht linear (Kurve a). Wird die zugeführte Spannung vorverzerrt (Kurve b), so wird die Verzerrung kompensiert (Kurve c)

$$i_R = S\,[(U_R)^{2,2} \text{ bis } (U_R)^3]$$
$$\text{allgemein } i_R = U^{\gamma} \cdot S$$

(siehe *Bild 2*, Kurve a). Ohne eine geeignete Vorverzerrung würden die dunklen Teile des Bildes an Kontrast verlieren und die hellen unnatürlich kontrastreich wiedergegeben werden. Die „Gradation" des Bildes wäre also verfälscht.

Zur sogenannten „Gamma-Vorverzerrung" von U_R wird daher $U_R^{1/\gamma}$ gebildet, allgemein mit U'_R bezeichnet.

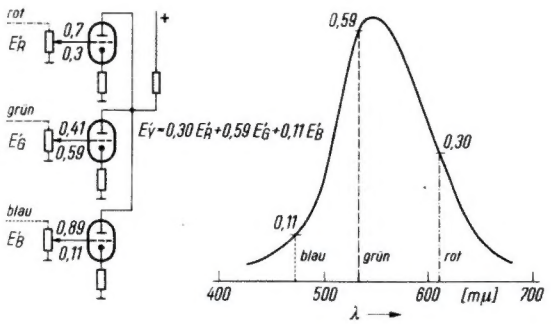
Die auf das Auge wirkende Summe ist dann linear korrigiert. Aus dem so gebildeten U'_R/U'_G und U'_B wird dann das entzerrte Leuchtdichtesignal U'_Y in folgender Weise zusammengesetzt:

$$U'_Y = 0{,}3\,U'_R + 0{,}59\,U'_G + 0{,}11\,U'_B$$

oder mit anderen Worten Y' besteht aus 30 % Signal von der roten, 59 % von der grünen und 11 % von der blauen Kameraröhre[1]) (*Bild 3*). Bei der elektrischen Zusammensetzung (Summierung) der drei Signale zum Leuchtdichtesignal wird dann die unterschiedliche Empfindlichkeit des Auges für verschiedene Farben mit berücksichtigt (*Bild 4*).

Wichtig hierbei ist, daß die Bilder der drei Kameraröhren absolut synchron abgetastet werden, damit die drei Signale zu einem einzigen scharfen Schwarzweiß-Auszug vereinigt werden können. Gerade an dieser Stelle ist deshalb eine außerordentlich sorgfältige Einstellung von besonderer Bedeutung, um diese Raster in Deckung zu bringen, denn nur dann kann die geforderte Kompatibilität zuverlässig erreicht werden.

[1]) Ab hier soll für U'_Y, U'_R usw. nur noch Y', R', G' und B' geschrieben werden, da in diesem Zusammenhang stets nur von Spannungen die Rede ist. Somit ist $Y' = 0{,}3\,R' + 0{,}59\,G' + 0{,}11\,B'$.



Oben links: Bild 3. Bildung des Leuchtdichtesignals Y' aus R', G' und B' in einem Verhältnis, das etwa der Empfindlichkeit des menschlichen Auges für die drei Primärfarben entspricht

Oben rechts: Bild 4. Farbempfindlichkeit des menschlichen Auges

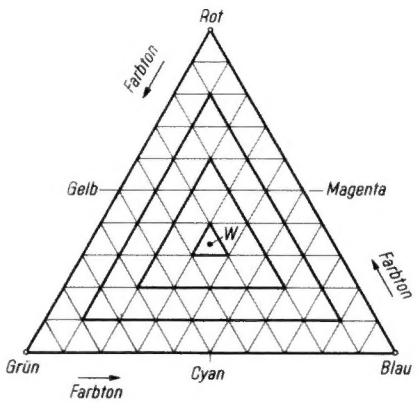


Bild 5. Maxwell-Ives Farbdreieck, gebildet aus den drei Primärfarben R, G und B. Auf dem äußersten Dreieck die aus diesen drei Primärfarben ermischbaren maximal gesättigten Farben. Mit nach der Mitte zu verminderter Sättigung entsprechen die inneren Farbdreiecke den Farben dreier Sättigungsstufen und des Mittelpunktes, der Weißpunkt W völliger Entsättigung

Farbartensignale

Das Hell und Dunkel eines Bildes mit den dazwischen liegenden beliebig abgestuften Grauwerten (Grautreppe) enthält das Leuchtdichtesignal Y' des Schwarzweiß-Empfängers. Man nennt diese Helligkeitsstufen auch die *„unbunten"* Farben, die durch die Größe *einer* Spannung zu kennzeichnen sind. Bei den Buntfarben ist jedoch eine so einfache Kennzeichnung nicht möglich, denn die sogenannte *„Farbart"* muß durch *zwei* Größen dargestellt werden. Die eine wird *Farbton* (Rot, Grün, Blau, Gelb) und die andere *Farbsättigung* genannt. Diese Begriffe sind am einfachsten durch folgendes gedankliches Experiment zu verstehen: Vermischt man z. B. rote Tinte mehr und mehr mit Wasser, so ergibt sich in zunehmenden Maße ein entsättigtes Rot, bis nur noch Wasser übrig bleibt. Von „gesättigt" bis nahezu „entsättigt" ist aber der Farbton „Rot" stets erhalten geblieben. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden gesättigte Farben auch als reine und weniger gesättigte als Pastellfarben bezeichnet.

Die aus drei „Primärfarben" ermischbaren Farbarten kann man in einem „Maxwell-Ives"-Farbdreieck darstellen (*Bild 5*). Längs jedes Schenkels dieses Dreiecks sind die Farbtöne aufgetragen, die aus den an beiden Endpunkten des Schenkels liegenden Primärfarben gemischt werden können. Damit sich ein kontinuierlicher Übergang von einem Farbton zum anderen ergibt, ist als Definition für den Farbort die folgende gewählt worden: Die Mischfarbart aus zwei Primärfarben findet man, indem man sich zwei Gewichte, die den prozentualen Anteilen der beiden Primärfarben entsprechen, an den Farbpunkten aufgehängt denkt. Der Schwerpunkt gibt dann den *„Farbort"* der Mischfarbe an (*Bild 6*).

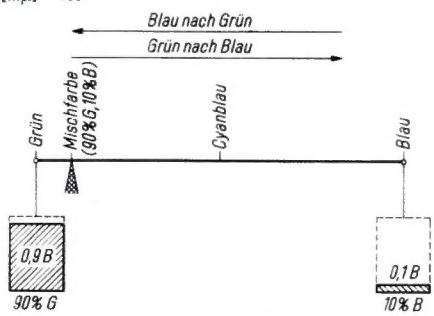


Bild 6. Der Ort der Mischfarbe in Bild 5 findet sich nach der Schwerpunktregel

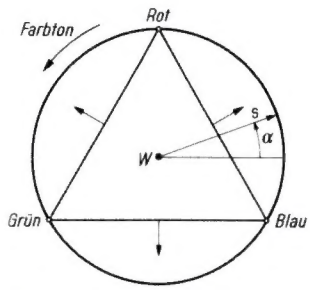


Bild 7. Transformation des Farbdreiecks in einem Kreis. Eine Farbart wird dann durch einen Zeiger mit der Farbsättigung S und dem Farbton α gekennzeichnet

Diese Schwerpunktregel gilt nicht nur für die Mischung zweier Primärfarben, sondern auch für die Mischung von drei Farben. Die an den Ecken eines Dreiecks aufgetragenen drei Primärfarben geben dabei gemischt als Schwerpunkt, die Mitte des Dreiecks, an. Dieser Punkt ist als „unbunt" definiert, weil die drei Primärfarben so ausgewählt sind, daß ihre Mischung aus gleichen Anteilen „Schwarzweiß" ergibt (Weißpunkt).

Für ein weißes Signal sind daher alle drei Farbkanonen der Bildröhre, die den drei Primärfarben entsprechen, mit gleichen Spannungen anzusteuern. Da jedoch die drei Farbphosphore unterschiedlich empfindlich sind, müssen selbstverständlich diese sogenannten *Phosphorkoeffizienten* bei der Ansteuerung der Bildröhre berücksichtigt werden.

In Bild 5 sind drei weitere Dreiecke eingezeichnet, die jeweils einer bestimmten Entsättigungsstufe entsprechen. Dieses „Maxwell-Ives"-Dreieck, in dem alle Farben definiert werden können, die sich aus den drei Primärfarben mischen lassen, wird nun zur besseren Verständlichkeit zu einem Kreis transformiert (*Bild 7*). Dadurch erhält man eine Darstellung, die es erlaubt, die jeweilige Farbart in Polarkoordinaten, also in Form eines Drehzeigers, zu bestimmen. Seine Länge S entspricht dann der Farbsättigung, und die Winkellage α definiert den jeweiligen Farbton. Stufen geringerer Farbsättigung wären in Bild 7 durch konzentrische Kreise anzudeuten. Damit ist schon ein prinzipieller Weg für eine zusätzliche Übertragung der Farbinformationen beim Farbfernsehen gefunden. Ein solcher Zeiger, der sich im Fernsehbild bei der Abtastung entsprechend den Farbtonschwankungen laufend verändert, kann nämlich mit einem Träger in einer gemischten Amplituden- und Phasenmodulation übertragen werden.

Um diese Art der Farbträgerübertragung realisieren zu können, ist es notwendig, eine bestimmte Trägerspannung (Farbträger) mit der jeweiligen bei der Abtastung des betreffenden Bildpunktes festgestellten Farbsättigung S in der Amplitude derart zu modulieren, daß bei vollgesättigten Farben die Amplitude die Größe 1 und bei vollkommen entsättigter Farbe die Größe 0 hat. Der gewünschte Farbton bzw. die Farbart bei vollgesättigter Farbe entspricht dabei einer bestimmten Phasenverschiebung des Trägers (Phasenmodulation) gegenüber einem unmodulierten und phasenstarren Referenzträger. Für die Feststellung der Nullphase muß dieser Referenzträger mit übertragen werden. Dazu werden kurze Trägerstöße, die sogenannten Farbsynchronimpulse (Burst), während der Bildaustastung eingeblendet (*Bild 8*). Der Farbträger läßt sich dem vom Schwarzweiß - Fernsehen her bekannten Leuchtdichtesignal Y' überlagern und gleichzeitig mit ihm übertragen (*Bild 9*).

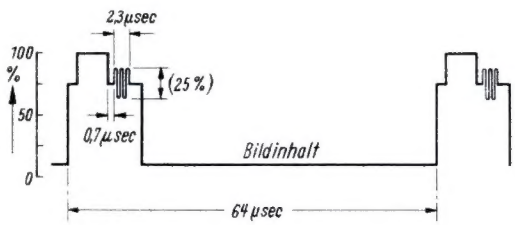


Bild 8. Farbsynchronimpuls (Burst)

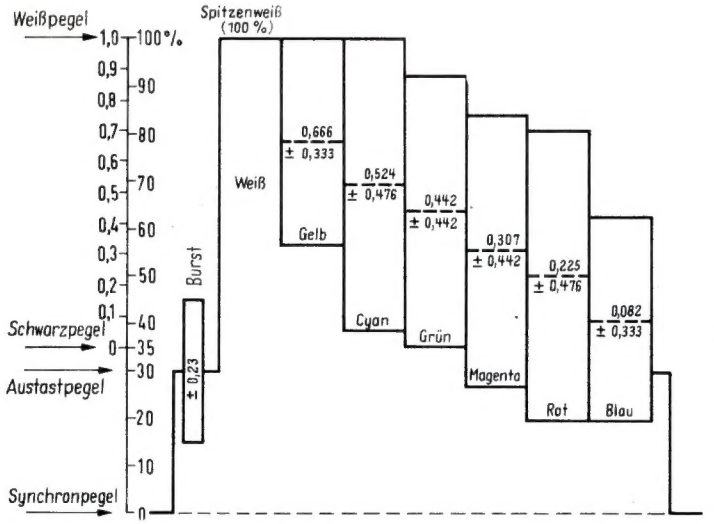


Bild 9. Leuchtdichtesignal für Farbbalken mit überlagertem Träger für ein NTSC-Signal (auch PAL)

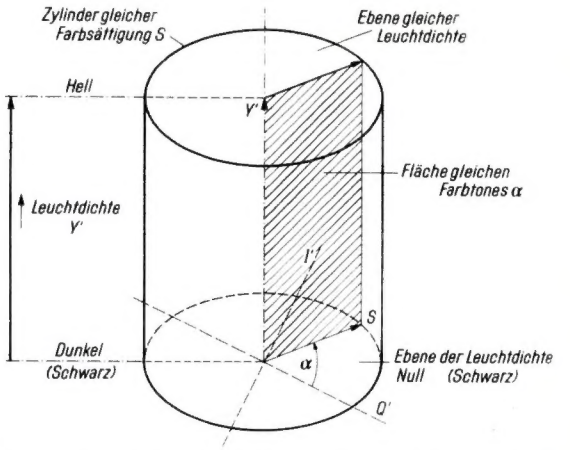


Bild 10. Darstellung der Farbvalenz in einem Zylinder. Farbvalenz ist Leuchtdichte Y' (links) mit Farbart (Kreise)

Diese Zusammenhänge lassen sich sehr anschaulich in einem dreidimensionalen Bild in Form eines Farbzylinders darstellen (*Bild 10*). In dieser Zeichnung ist deutlich zu erkennen, wie der Farbträger, der wieder durch einen in einem Kreis liegenden Zeiger dargestellt ist, entsprechend der jeweiligen Größe des senkrecht dargestellten Leuchtdichtesignals Y' hinauf und hinunter geschoben wird. Befindet sich der Kreis in seiner untersten Stellung, so ist der Bildschirm dunkel. Dagegen ist in seiner obersten Lage die maximale Helligkeit vorhanden. Leuchtdichte und Farbart zusammen bilden die sogenannte „*Farbvalenz*".

Die Frequenz des phasenmodulierten Farbträgers muß so hoch gewählt werden,

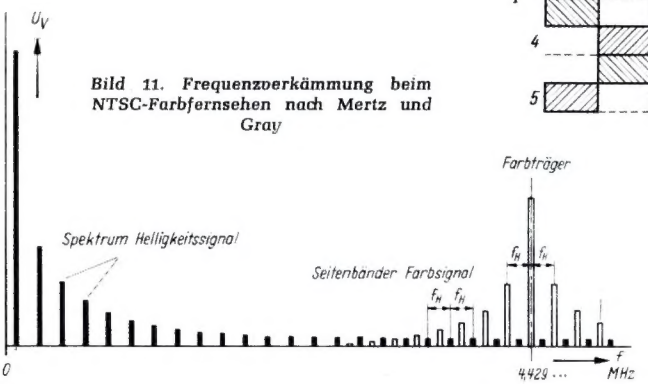


Bild 11. Frequenzverkämmung beim NTSC-Farbfernsehen nach Mertz und Gray

daß er noch in das Schwarzweiß-Videoband hineinpaßt, im Schwarzweiß-Bild aber nur wenig sichtbar wird. Die genaue Frequenz errechnet sich nach Überlegungen, die im folgenden dargestellt werden.

Farbträgeroffset

Schon vor vielen Jahren hatte man im Zusammenhang mit der Bildtelegrafie gefunden, daß das Spektrum eines Fernsehsignals aus diskreten Spektrallinien im Abstand der Zeilenfrequenz besteht. In die sich dadurch ergebenden Zwischenräume, die übrigens im Schwarzweiß-Fernsehen nicht ausgenutzt werden, läßt sich nun prinzipiell ein zweites zusätzliches Signal, wenn es entsprechend aufbereitet ist, hineinsetzen (*Bild 11*). Da nun aber die einzelnen Farbsignale, die, wie noch gezeigt wird, aus den Videosignalen der einzelnen Farbkanäle abgeleitet werden, ebenfalls die gleiche Spektralverteilung aufweisen, ist es durchaus möglich (sofern entsprechende Vorbereitungen getroffen sind), diese in die Spektrallinien-Zwischenräume des Schwarzweiß-Signales hineinzulegen. Die Bandbreite dieser Farbsignale ist allerdings wesentlich geringer (ca. 1 MHz), da für die Farbe über dem Helligkeitssignal (Schwarzweiß-Signal), wie schon vorher dargelegt, die volle Schärfe nicht benötigt wird.

Werden diese Farbsignale auf einen Träger moduliert, so enthält auch dieser nur diskrete Seitenbänder. Wird die Frequenz des Trägers nun so gelegt, daß sie ein Vielfaches der halben Zeilenfrequenz beträgt, so liegt der Träger in einem „Loch" des Schwarzweiß-Signalspektrums, und damit werden auch alle Spektrallinien der Farbinformationen stets in den vorher genannten Zwischenräumen liegen (Bild 11).

Damit nun der Farbträger auf dem Bildschirm nur wenig sichtbar wird, verkoppelt man ihn mit der Zeilenablenkung. Er wird nur als eine zwar schwach sichtbare, dann aber stehende Perlschnur auf jeder Zeile erscheinen. Bei NTSC wird diese Perlschnur von Zeile zu Zeile und Raster zu Raster so verschoben, daß in zwei Rastern für diese

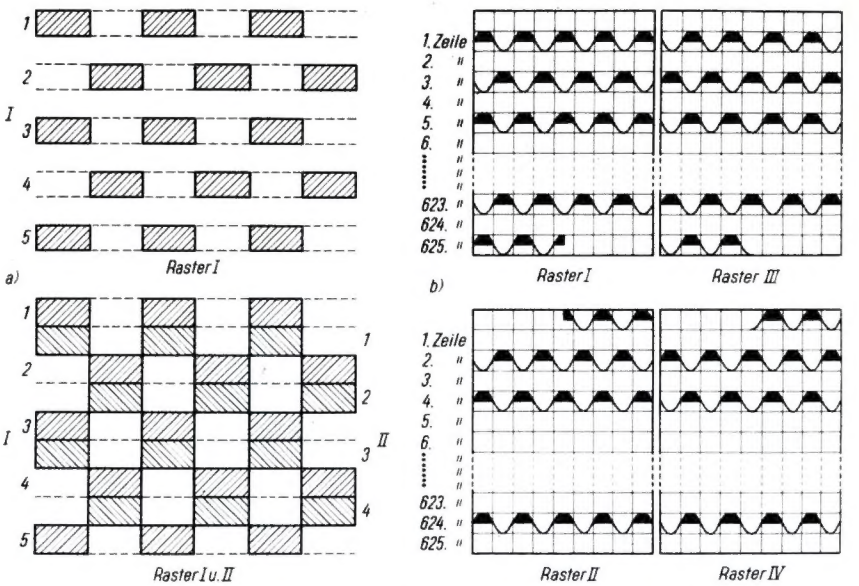


Bild 12. Hilfsträgerphase und entstehendes Störmuster: a) Störmusteraufbau über die zwei Raster eines Bildes, b) Phasenlage des Hilfsträgers über vier Raster (zwei Bilder)

Punkte die Anordnung eines Schachbrettes entsteht (*Bild 12a*). Damit nun dieses Muster für das Auge nicht erkennbar wird, läßt man es in dem von den nächsten zwei Rastern aufgebauten Bild negativ erscheinen. Dann kompensiert sich dieses Schachbrettmuster im Auge über vier Rasterperioden, also über zwei Bilder.

Zur Erfüllung dieser Kompensationsbedingung wird die Frequenz des mit der Zeile fest verkoppelten Farbträgers $f_{(NTSC)}$ gleich einem ungradzahligen Vielfachen der halben Zeilenfrequenz f_H gewählt (Halbzeilenoffset). Damit wird sowohl diese Bedingung erfüllt, und es werden auch die Energiespektren der Farbe in die Lücken des Leuchtdichtespektrums gelegt. Sie errechnet sich nach

$$f_{(NTSC)} = (2\,n - 1)\,\frac{f_H}{2} = (n - {}^1/_2)\,f_H$$

Bei der genannten Definition dieser Frequenz hat man für Europa bei NTSC sich vorläufig auf n = 284 festgelegt, da sich damit eine günstige Schaltung für das hierzu notwendige Teilergerät aufbauen läßt. Setzt man n = 284 in obige Formel ein, so fallen auf jede Zeile

$$n - {}^1/_2 = 283{,}5 \text{ Perioden des Trägers}$$

Mit der Horizontalfrequenz f_H = 15 625 Hz für 625 Zeilen ergibt dieses somit eine Frequenz des Farbträgers von

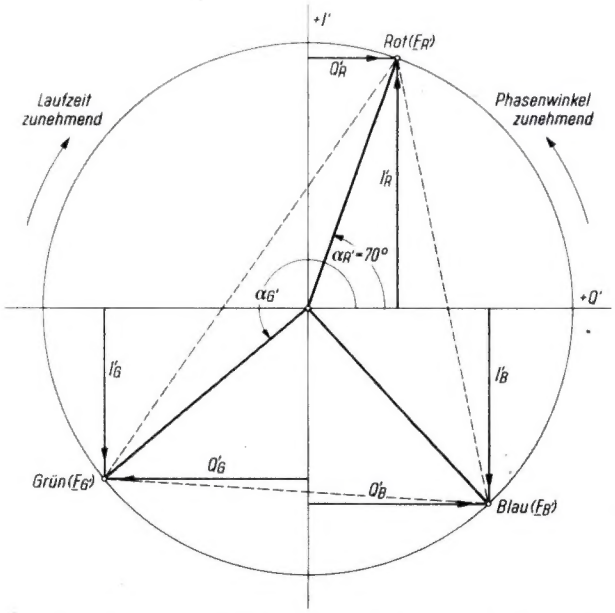


Bild 13. Darstellung der NTSC-Farbzeiger E_R', E_G' und E_B' in karthesischen Koordinaten und einem nicht gleichschenkligen Dreieck. E_R' besteht aus Q_R' und I_R' usw.

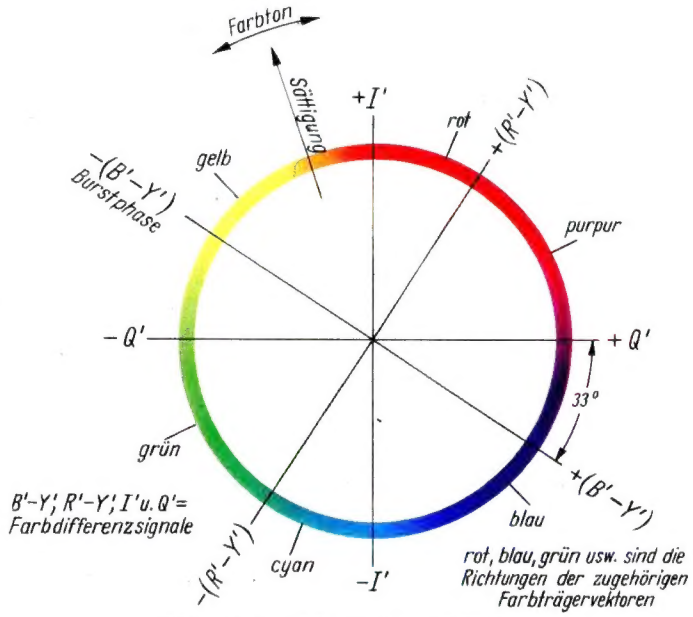


Bild 14. Original-Farbkreis des NTSC-Systems

Farbtafel I. Bildschirm-Aufnahmen bei NTSC und PAL

NTSC. Phasenfehler etwa +70°

NTSC. Phasenfehler etwa −70°

NTSC und PAL. Normalwiedergabe

PAL. Phasenfehler ±70°

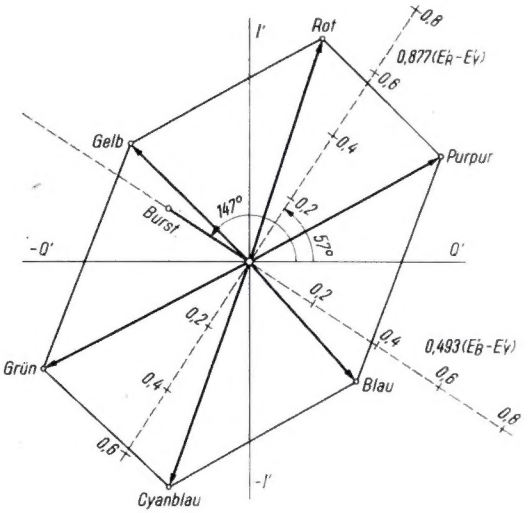


Bild 15. Vektorskopbild eines Farbbalkensignals

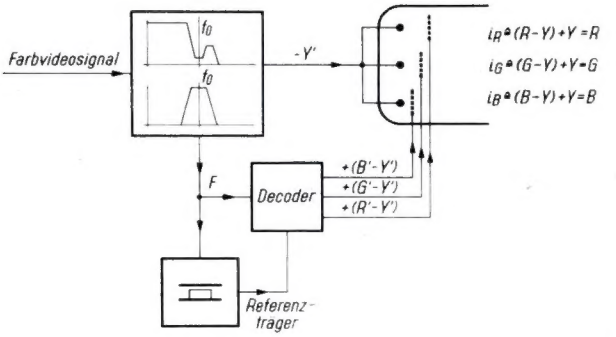
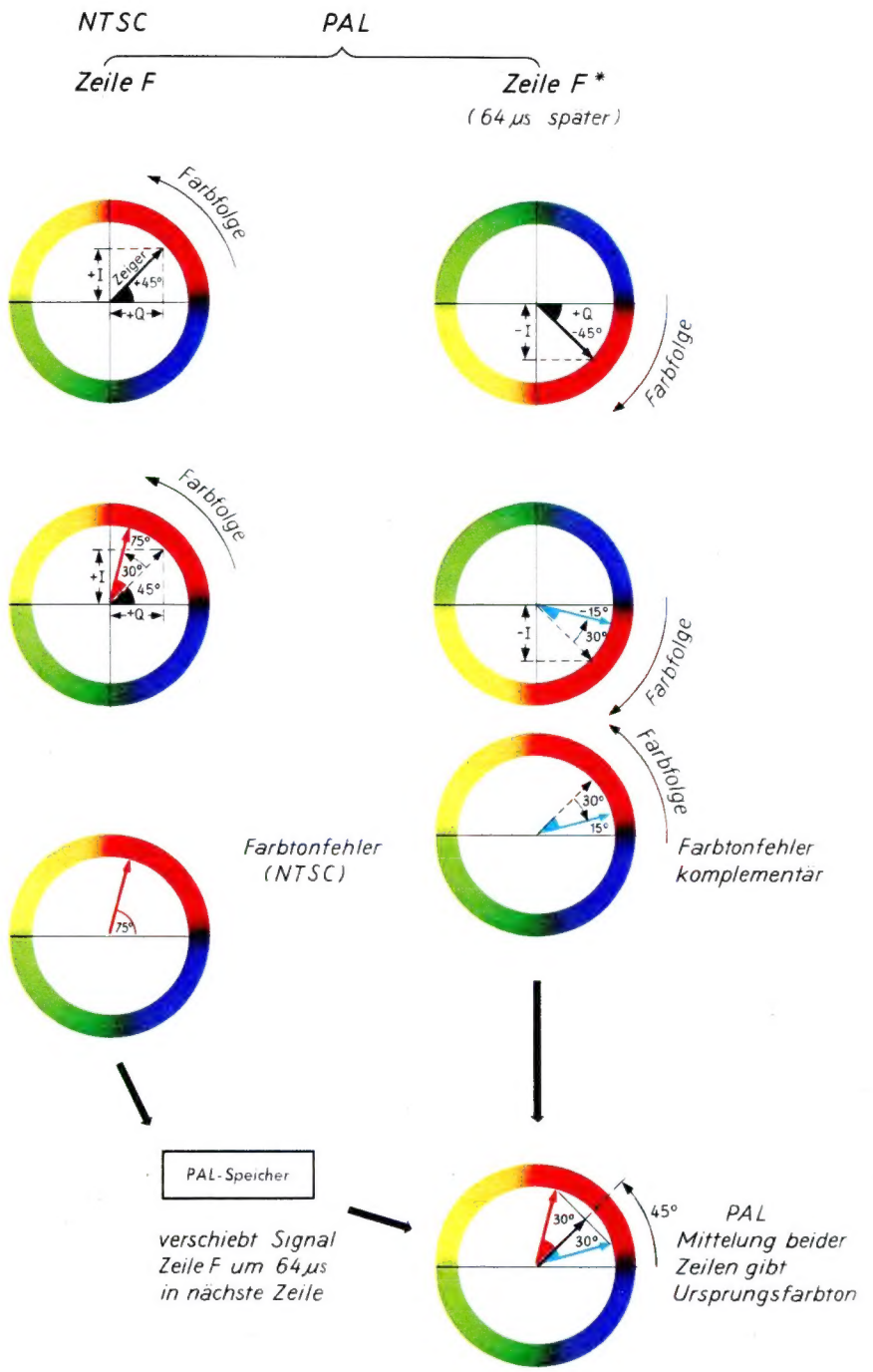


Bild 16. Addition von Helligkeitssignal Y' und Farbdifferenzsignalen (R' – Y'), (G' – Y') und (B' – Y') in der Bildröhre

$$f_{F\,(NTSC)} = 15\,625 \cdot 283{,}5 = 4\,429\,687{,}5 \text{ Hz}$$
oder etwa 4,43 MHz.

Weil auf eine Zeile also keine ganze Zahl von Farbträgerperioden fällt, wird somit in zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Zeilen desselben Rasters die Farbträgerschwingung automatisch umgepolt. Die Perlschnur erscheint deshalb in aufeinanderfolgenden Zeilen $\lambda/2$ versetzt. Stellt man nun fest, in welcher Phasenlage die Farbträgerschwingung am Zeilenanfang des folgenden Rasters startet, dann sind am Ende des mit 312 Zeilen als beendet anzusehenden ersten Rasters 312 · 283,5 = 88 452 Farbträgerperioden abgelaufen. Das zweite Raster muß also ebenso wie das erste mit der Farbträgerphase „0" beginnen. Es ergeben sich aber, da nun inzwischen zwei Raster, also 625 Zeilen geschrieben sind, 625 · 283,5 = 177 187,5 Perioden am Ende jeden zweiten Rasters, und das dritte Raster beginnt nun wieder mit einer um $\lambda/2$ verschobenen Farbträgerphase. Zwischen dem dritten und vierten Raster findet natürlich ebenso wie zwischen dem ersten und zweiten Raster keine Verschiebung statt. Beim fünften Raster, also dem dritten Bild, beginnt der ganze Ablauf von vorn. In Bild 12 ist dieses Perlenraster für die Raster 1 und 2 erkennbar; für die Raster 3 und 4 wird nach dem eben Gesagten schwarz und weiß vertauscht, so daß die gewünschte Kompensation entsteht. Das Störmuster hat sich während dieses Viererzyklus wie gewünscht im Auge kompensiert (Bild 12).

Leider ist die kompensierende Wirkung nicht vollkommen. Die Ursache liegt darin, daß bei 50 Rastern in der Sekunde dieser Zyklus mit nur 12,5 Hz abläuft und gleichzeitig wegen des stroposkopischen Effektes ein Wandern des Störmusters über den Bildschirm vorgetäuscht wird, wenn das Auge der Verschiebung der Helligkeitspunkte von Raster zu Raster folgt. Zusätzlich wird dieser Effekt noch dadurch unterstützt, daß die Krümmung der Bildröhrenkennlinie und die damit unterschiedliche Helligkeitssteuerung der positiven und negativen Halbwellen einer vollkommenen Kompensation entgegenwirkt.



Rechts: Bild 17. Verfälschte Farbwiedergabe bei NTSC infolge Phasenfehlers auf dem Übertragungsweg (linke Seite) und Kompensation des Farbtonfehlers durch PAL

Modulation des NTSC-Trägers

Bei der Durchführung der Modulation des NTSC-Trägers geht man einen Umweg. Nach *Bild 13* kann nämlich der Zeiger, der die Farbart darstellt, ebenfalls durch zwei rechtwinklig aufeinanderstehende Komponenten I' und Q' definiert werden. Diese beiden Komponenten werden in je einem Balancemodulator, der gleichzeitig eine Unterdrückung des Trägers bewirkt, moduliert und anschließend nach 90° Phasenverschiebung, entsprechend der rechtwinkligen Koordinaten, aufeinander addiert. Das Resultat ist dann ein Träger mit der Null-Phase α, die durch den Farbton bestimmt ist, und der Amplitude S, deren Größe von der jeweiligen Sättigung abhängig ist.

Bild 14 zeigt diesen Farbkreis ausführlich in der Farbträgerebene. Der Winkel α bezieht sich in dieser Darstellung auf die positive Q'-Achse und weicht somit von der üblichen NTSC-Darstellung, die sich auf ein um 33° gedrehtes Koordinatensystem bezieht, ab. Um den Winkel α im Empfänger wieder bestimmen zu können, wird der hierzu notwendige Referenzträger als drittes zusätzliches Signal mit der Schwarzweiß-Information in jeder Zeile in Form des sogenannten *Burst* übertragen. Dieser stellt gewissermaßen Farbträger-Synchronimpulse oder auch Farbträgerstöße dar, mit denen über eine Integrationseinrichtung der Referenzträger im Empfänger phasensynchron zum Sender wiedergebildet wird.

Bild 9 zeigt an Hand eines Farbbalkensignals, wie eine Zeile bei dem NTSC-Verfahren im Oszillogramm aussieht. Die Farbbalkenfolge ist so gewählt, daß ein Helligkeitssignal Y' in Form einer abfallenden Treppe entsteht (heute übliches Testsignal). Dem Signal ist der modulierte Träger zusammen mit dem Burst überlagert.

In *Bild 15* sind die Endpunkte des Farbzeigers für dieses Balkenmuster in einem Vektorskopbild dargestellt. In ihm ist zu sehen, daß man es genau genommen nicht mit einem Kreis zu tun hat, auf dem die Endpunkte der Zeiger liegen, sondern mit einer Art Ellipse. Die Ursache hierfür sind die nicht linearen, gammavorentzerrten Signale und die Art der I'- und Q'-Koordinate. Allerdings hat dieses auf die grundsätzlichen Überlegungen keinen Einfluß. In diesem Beitrag soll deshalb die „Kreis-Darstellung" weiter benutzt werden.

Farbdifferenzsignale

I' und Q' sind sogenannte Farbdifferenzsignale. Sie werden im Coder aus den Farbsignalen R', G' und B' hergestellt, und zwar über den Umweg der leichter verständlichen Farbdifferenzsignale $R'-Y'$, $G'-Y'$ bzw. $B'-Y'$. Ein Farbdifferenzsignal, z. B. $R'-Y'$ stellt den Farbauszug R' dar, von dem das aus R', G' und B' gemischte Leuchtdichtesignal Y' abgezogen ist. Anders ausgedrückt heißt das: Ein Farbdifferenzsignal ist ein Farbsignal, von dem die Helligkeitsinformation, die eine breitbandige Übertragung erfordert, entfernt ist. Die Farbdifferenzsignale selbst werden schmalbandig (ca. 1 MHz) gemacht und dann für die Modulation verwendet. Durch Addition der beiden einfach herzustellenden Signale $R'-Y'$ und $B'-Y'$ werden die Spannungen I' und Q' hergestellt.

$$I' = 0{,}74\,(R'-Y') - 0{,}27\,(B'-Y')$$
$$Q' = 0{,}48\,(R'-Y') + 0{,}41\,(B'-Y')$$

Natürlich können sie auch direkt aus R', G' und B' hergestellt werden. Es ist nämlich auch:

$$I' = 0{,}60\,R' - 0{,}28\,G' - 0{,}32\,B'$$
$$Q' = 0{,}21\,R' - 0{,}52\,G' + 0{,}31\,B'$$

I' und Q' wurden aus ganz bestimmten Gründen gewählt. Q' kann nämlich, wie psychologische Tests ergeben haben, noch schmalbandiger als 1 MHz übertragen werden. Von dieser Möglichkeit, die eine Modulationsachse (Q') mit nur 0,6 MHz Bandbreite zu übertragen, macht man bei NTSC ebenfalls Gebrauch. Die I'-Achse kann dann in einer Art Restseitenbandmodulation mit mehr als 1 MHz, nämlich mit 1,3 bis 1,5 MHz Bandbreite übertragen werden. Die Modulationsachse von I' entspricht den Farbübergängen von Orange nach Zyanblau und Q' von Laubgrün nach Violett.

Im Empfänger müssen aus dem phasenmodulierten Signal die drei Farbdifferenzsignale $R'-Y'$, $G'-Y'$ und $B'-Y'$ wieder gebildet werden. Jedes dieser Signale wird dem entsprechenden Steuergitter der entsprechenden Bildröhrenkanone zugeführt. Wird allen drei Bildröhrenkatoden gleichzeitig das Leuchtdichtesignal Y' in entsprechender Polarität zugeleitet, so erfolgt in jeder Kanone die Addition von Y', so daß für die eigentliche Strahlsteuerung wieder die Ursprungssignale R', G', B' übrig bleiben *(Bild 16)*. Der hierzu benötigte Decoder arbeitet mit zwei Synchron-Demodulatoren, denen der Referenzträger in richtiger Phase zugeführt ist. Sie liefern I' und Q', aus denen über eine Widerstandsmatrix die drei der Bildröhre außer Y' zuzuführenden Signale $R'-Y'$, $G'-Y'$ und $B'-Y'$ entnommen werden können. Die Schaltungsweise des Decoders ist für die unterschiedliche Wirkungsweise der Systeme nicht wichtig. Es soll deshalb auf die Details dieser Schaltung auch nicht näher eingegangen werden.

Der Farbtonzeiger F (Bild 14 oben links) durchläuft bei der NTSC-Codierung für gesättigte Farben, je nach den Polaritäten und Größen von I' und Q', einen Kreis (es ist in der Praxis, wie schon erwähnt, kein genauer Kreis), auf dem von $\alpha = 0$ ausgehend bis $\alpha = 360°$ die Farbentöne in folgender Reihenfolge nacheinander angezeigt werden: Magenta (eine Purpurfarbe), Rot, Gelb, Grün, Zyanblau, Blau.

Weil die Phase des Zeigers also den Farbton angibt, reagiert das NTSC-System empfindlich auf Übertragungsfehler, welche den auf die Referenzträgerphase bezogenen Phasenwinkel α verfälschen. Dieses kann z. B. dadurch geschehen, daß der Referenzträger vom Burst in falscher Phase regeneriert wird, denn dann dreht sich sozusagen der ganze Farbkreis. Es ist deshalb im NTSC-Empfänger ein von Hand zu bedienender Regler notwendig, mit dem der richtige Farbton nach dem Bildeindruck wieder eingestellt werden kann. Mit ihm wird sozusagen der Farbkreis in seine Sollage gedreht. Da dieses für den Laien außerordentlich schwierig ist und nach den Erfahrungen in den USA relativ häufig vorgenommen werden muß, ist dieser Farbtonregler sehr unbequem. Viel unangenehmer sind die fast unvermeidbaren Verzerrungen der sogenannten „differentiellen Phase". Vom Leuchtdichtesignal wird nämlich das Farbsignal durch die Kennlinien der Röhren oder Transistoren im Sender, in den Übertragungsverstärkern und im Empfänger hin- und hergeschoben. Dabei ändern sich die komplexen Übertragungswiderstände und damit auch die Phase des Farbzeigers anders als die des Burst, wodurch sich wiederum Farbverfälschungen ergeben *(Bild 17)*.

In der linken Reihe ist NTSC dargestellt. Oben ist der Farbkreis mit einem schwarzen Zeiger $\alpha = 45°$ entsprechend einem Purpur-Farbton zu sehen. Nimmt man nun an, daß auf dem Übertragungsweg ein Phasenfehler $\varphi = 30°$ entstanden ist, dann wird der Zeiger auf 75° (Rot) gedreht, d. h. die ursprüngliche Purpur-Farbe in Richtung Rot verfälscht. Dieser Vorgang ist in den darunterliegenden Farbkreisen dargestellt. Da aber solche Winkelfehler unter Umständen mit sehr unterschiedlichen Leuchtdichtesignalen behaftet sind, ist eine Korrektur mit einem Einstellregler zur Farbtonnachregulierung nur für einen engen Bereich der Aussteuerung möglich. Um diese Verzerrungen aufzuheben und damit die Bedienung eines Farbempfängers für den Fernsehzuschauer einfacher zu machen, wurde die PAL-Modulation entwickelt.

Das PAL-System

Der Grundgedanke für das PAL-Verfahren war etwa folgender:

Wenn es gelingen sollte, das NTSC-System durch entsprechende schaltungstechnische Modifizierung zu zwingen, im Empfänger die unvermeidlichen Phasenfehler in jeweils zeitlich aufeinanderfolgenden Zeilen entgegengesetzt zu zeigen, so müßte es auch möglich sein, durch gleichzeitige Auswertung dieser Zeileninformationen die beiden entgegengesetzten Fehler zu kompensieren. Hierzu ist ein Speicher nötig, der den Informationsgehalt einer Zeile über deren Dauer (64 µsec) speichert und sie der nächstfolgenden Zeile, jedoch mit entgegengesetztem Fehler, liefert. Auf mathematischem Wege fand sich hierfür eine Lösung, die mit PAL (*P*hase *A*lternation *L*ine) bezeichnet und vom Verfasser in die Praxis umgesetzt wurde.

Wieder soll der Purpur-Farbton des vorigen Beispieles in Bild 17 mit $\alpha = 45°$ übertragen werden, und wieder soll sich ein Phasenfehler φ von z. B. 30° ergeben. Dadurch ergibt sich wieder eine Farbtonverfälschung von Purpur zu Rot hin (siehe erster Farbkreis der linken Reihe in Bild 17). Polt man nun das I'-Signal der NTSC-Modulation in einer Zeile um, so daß sich für $+I'$ jetzt $-I'$ ergibt bzw. sich $-I'$ in $+I'$ verwandelt, dann entsteht ein Farbkreis, bei dem die vorher genannte Farbton-Reihenfolge zwar erhalten bleibt, aber in umgekehrter Richtung abläuft. Das bedeutet, daß der Zeiger für irgendeine Farbe jetzt an der Q'-Achse gespiegelt oder – mit anderen Worten – der Winkel α jetzt negativ geworden ist.

In dem in Bild 17 angeführten Beispiel ist in der rechten Reihe diese Modulationsart, die anstelle von F bei NTSC (links) mit F^* bezeichnet ist, dargestellt. Auch hierbei sei der Purpur-Farbton übertragen worden, der aber jetzt bei $\alpha = -45°$ liegt. Wenn man nun annimmt, daß der gleiche Phasenfehler von $\varphi = +30°$ auf der Übertragungsstrecke aufgetreten ist, dann wird $\alpha = -45°$ in $\alpha + \varphi = -45° + 30° = -15°$ geändert. Der Farbton würde also in dieser Zeile in Richtung Blau verfälscht und hat somit in diesem Farbkreis genau die Komplementärfarbe zur Verfälschung bei NTSC angenommen. Nun ist nur noch eine Mischung beider Farbverfälschungen vorzunehmen und die Ursprungsfarbe ist wieder erreicht.

Jedem Farbkreis entspricht sozusagen eine bestimmte Schaltung, eine bestimmte Matrix, in der im richtigen Verhältnis die Spannungen gebildet werden, die den einzelnen Steuerorganen der Farbbildröhre zugeführt werden. Zur Mischung der entgegengesetzt verzerrten Signale in derselben Schaltung muß der für die Übertragung benutzte Zeiger wieder in einen solchen verwandelt werden, der in den NTSC-Farbkreis paßt, wenn für diesen die Schaltung ausgelegt ist. Dazu spiegelt man wieder den Zeiger F im Empfänger um die Q'-Achse, indem auch im Empfänger I' einfach umgepolt wird, und erhält das Signal, wie es in Bild 17 im dritten Farbkreis dargestellt ist. Entnimmt man nun aus einer Verzögerungs-

leitung mit der Verzögerungszeit einer Zeilendauer = 64 µsec das Signal der vorherigen Zeile (NTSC-Modulation linke Reihe dritter Farbkreis) und addiert beide Zeilen aufeinander, so entsteht wieder der *Ursprungszeiger* von + 45°, also der unverfälschte Winkel α, der lediglich um die kleine Größe $S\ (1 - \cos\varphi)$ bei der geometrischen Summierung in seiner Länge vermindert ist. Die Farbe wird also in ihrem Farbton nicht mehr verändert und nur kaum sichtbar entsättigt oder ausgebleicht.

Eigentlich entsteht bei der Addition ein Signal von etwa doppelter Größe. Der Faktor 2, der nur eine Verstärkung darstellt, ist in Bild 17 nicht berücksichtigt. Der Mittelwertzeiger ist hier mit halber Amplitude gezeichnet, damit er in den Farbkreis paßt.

Die Änderung des Drehsinns im Farbkreis oder die Spiegelung des Winkels α an der Q'-Achse wird erreicht, indem das I'-Signal umgepolt, also von $+I'$ in $-I'$ verwandelt wird. Im PAL-Coder ist I' also beim Wechsel von Zeile zu Zeile einmal umzupolen. Zu diesem Zweck wird der eine mit I' modulierte Träger, der bei NTSC mit 90° Phasenverschiebung zu dem mit Q' modulierten zu addieren ist, hier in einer Zeile mit 90° und in der nächsten mit − 90° addiert. Das bedeutet, daß der zum I'-Modulator geführte Träger von Zeile zu Zeile um 180° geschaltet werden muß. Diese Trägerspannungen sind einfacher an beiden Enden eines bifilar gewickelten Gegentakttransformators abzunehmen, als es mit den umgeschalteten I'-Videosignalen, für die eine korrekte Schwarzwerthaltung vorgesehen werden muß, möglich ist.

Die Voraussetzungen für diese Mittelwertbildung von zwei Zeilen ist die bekannte Tatsache, wonach sich bei einem normalen Fernsehbild die Signalabläufe in zwei aufeinanderfolgenden Zeilen nicht wesentlich, also kaum merklich unterscheiden. Dies hatte zuerst *H. de France* ermutigt, erst recht bei der Übertragung von schmalbandigen Farbdifferenzsignalen die aufeinanderfolgenden Farbinformationen als praktisch gleich anzusehen und auf Grund dieser Überlegungen sein Secam-System zu entwickeln, bei dem er auf die gleichzeitige Übertragung der beiden im Empfänger für die Definition eines Farbzeigers erforderlichen Farbdifferenzsignale verzichtet. Dabei spart er abwechselnd in aufeinanderfolgenden Zeilen jeweils ein Farbsignal ein und simuliert die Gleichzeitigkeit der beiden Signale im Empfänger dadurch, daß er die gerade nicht übertragene Signalkomponente durch Zeitverzögerung von der Dauer einer aus der Zeilenlänge vorhergehenden Zeile gewinnt.

Beim PAL-Verfahren wird diese Farbsignal-Übereinstimmung von zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Zeilen dazu benutzt, mögliche Übertragungsfehler zu kompensieren. Dieses geschieht durch eine *Mittelung* der Farbinformationen.

Für die Steuerung der Bildröhre im Empfänger werden wieder die Farbdifferenzsignale selbst benötigt. Bei NTSC werden sie durch eine phasenempfindliche Synchrondemodulation gewonnen, bei PAL jedoch auf eine neuartige Weise, nämlich durch Addition und Subtraktion der Farbsignale zweier Zeilen. Dabei wird das amplituden- und phasenmodulierte Farbträgersignal aufgespalten in zwei Komponenten, von denen die eine nur noch mit dem einen Farbsignal (Q') amplitudenmoduliert ist, und die zweite mit dem anderen (I'). Beide können dann nach einfacher Gleichrichtung mit Trägerzusatz und nach Dematrixierung in $R' - Y'$, $G' - Y'$ und $B' - Y'$ zur Steuerung der Bildröhre benutzt werden.

In *Bild 18* ist die Reihenfolge der Zeilen in einem Zeilensprungraster dargestellt. Greift man sich eine beliebige Zeile, z. B. die 2 *n*-te, aus dem Raster heraus, so kann man die vorhergehende mit $2n - 1$ und die nachfolgende mit $2n + 1$ numerieren. Dann hat die Zeile 2 n die eine Modulationsart und $2n - 1$ sowie $2n + 1$ die andere. Hier werden wir die Zeile $2n - 1$ mit *a*, die nächsten mit *b*, *c* bezeichnen (Bild 18).

Wie zu sehen ist, liegen beim Zeilensprung die zeitlich aufeinanderfolgenden Zeilen nicht direkt nebeneinander. In *Bild 19* sind die Zeigerdiagramme für die trägerfrequente Summierung der Signale der Zeilen $a + b$ und $b + c$ (entsprechend der Numerierung von Bild 18) zur Gewinnung von Q' sowie die Subtraktion der Signale der Zeilen $a - b$ und $b - c$ zur Gewinnung von I' ausführlich dargestellt. Deutlich wird, wie von Zeile zu Zeile das I'-Signal trägerfrequent umgepolt erscheint. Die 90°-Lage von I' gegen Q' bleibt unabhängig von jeder Drehung des Phasenfehlers erhalten.

Der benutzte Speicher ist eine Ultraschall-Verzögerungsleitung, wie sie 1942 von *Kruse* (Telefunken) erstmalig für Radargeräte angegeben wurde. Ein Bleititanat-Wandler an einem Ende eines Glasstabes (*Bild 20a*) setzt das trägerfrequente Farbsignal in Ultraschallwellen um, die sich längs des Stabes ausbreiten. Ein zweiter Wandler am anderen Ende des Stabes wandelt die Ultraschallwellen wieder in eine trägerfrequente Spannung zurück, die dadurch um die Laufzeit der Ultraschallwellen über die Stablänge (etwa 64 µsec) zeitlich verzögert sind. Moderne Spezialgläser, wie sie auch für andere Zwecke der Technik verwendet werden, haben eine derart kleine Temperaturabhängigkeit der Laufzeit, daß auch nach einer Verzögerung eines 4,43-MHz-Signals um die Dauer einer Zeile, also um 283,5 Farbträgerperioden, am Ausgang der Leitung die Farbträgerschwingung noch genau phasenkonstant zum Eingang gehalten wird.

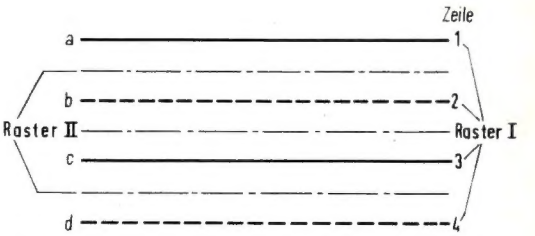


Bild 18. Zeilenfolge bei PAL-Modulation. Zeilen a, c, ... mit Modulation F (NTSC), Zeilen b, d ... mit Modulation F

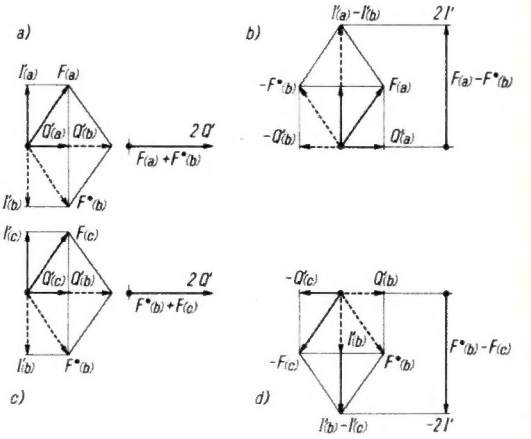


Bild 19. Addition und Subtraktion bei PAL zur Trennung von I' und Q'

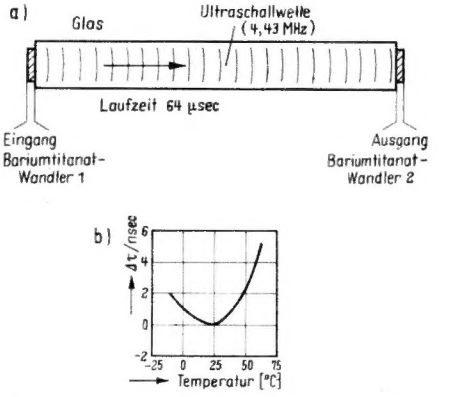


Bild 20. Ultraschall-Verzögerungsleitung: a) Prinzipieller Aufbau, b) Temperaturgang der Verzögerungszeit

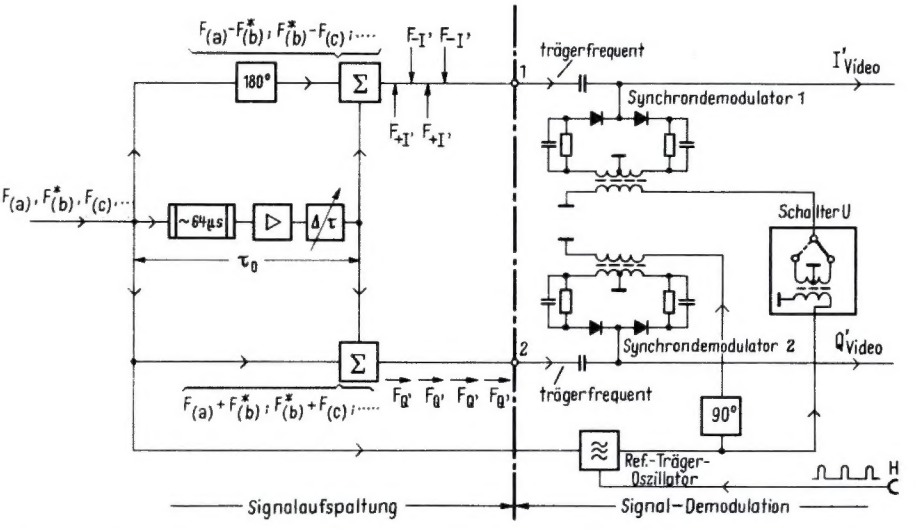
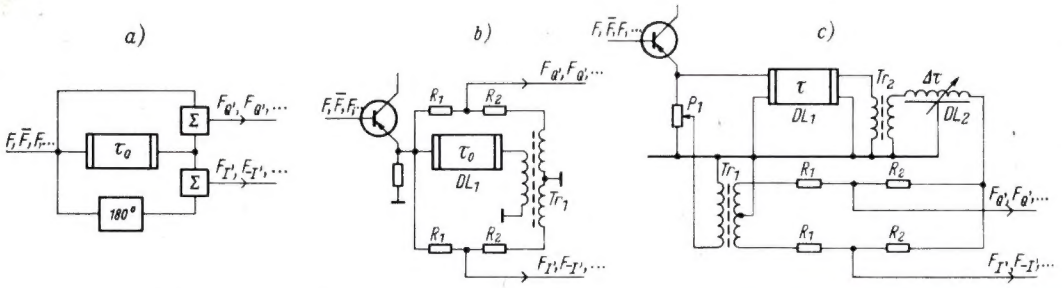


Bild 21. Prinzip der Addier- und Subtrahierschaltung für die Signalaufspaltung bei PAL (links). Synchrondemodulation der trägerfrequent getrennten Signale und Aufhebung der I'-Kommutierung durch elektronischen Schalter U im Referenzträgerweg (rechts)



Links: Bild 22. Signalaufspaltung nach Bild 21 beim PAL-System: a) Blockschaltbild des Laufzeitdemodulators ohne Synchrondemodulatoren, b) Prinzip der Grundschaltung, c) erweiterte Grundschaltung mit Zusatzverzögerungsleitung

(Bemerkung: $\overline{F}$ ist äquivalent F^*, z. B. in Bild 21)

Die Leitungen, wie sie z. B. zur Zeit verwendet werden, haben folgende technische Daten:

Laufzeit	63,8 ± 0,1 µsec
Temperaturgang	$0{,}75 \cdot 10^{-6}/°C$
Mittenfrequenz	4,43 MHz
Bandbreite	unabgestimmt 2,0 bis 2,5 MHz, abgestimmt etwa 3 MHz
Dämpfung des Nutzsignals:	max. 20 dB bei 50 Ω Lastwiderstand
Unerwünschte Reflektionen:	mehr als 26 dB unter dem Nutzsignal
Innenwiderstand der Wandler:	etwa 50 Ω und etwa 1000 pF.

Bild 20*b* zeigt den gemessenen Temperaturgang einer solchen Leitung. In der Praxis benutzt man etwas verkürzte Ultraschall-Leitungen mit $\tau = 63{,}8$ µsec und größerer Laufzeittoleranz, die mit einer einstellbaren drahtgewickelten, billigen Verzögerungsleitung auf eine Verzögerung von genau 238,5 Farbträgerperioden einmalig abgeglichen werden.

Das Grundprinzip eines PAL-Empfängers mit Laufzeitleitung nach Bild 19 besteht also darin, daß durch eine phasenrichtige Summierung der Farbträgerspannungen zweier Zeilen ein nur mit Q' modulierter Farbträger abgespalten wird. Analog wird durch Subtraktion der nur mit I' modulierte Träger gewonnen, allerdings erfolgt dies von Zeile zu Zeile mit um 180° wechselnder Phase. Die fehlerkompensierende Mittelung ist in beiden Prozessen gleich mit eingeschlossen. Eine Grundschaltung dafür ist in *Bild 21* dargestellt. Der Subtraktion entspricht ebenfalls eine Summierung, wenn das eine der beiden Signale, wie im Bild angedeutet, umgekehrt, d. h. um 180° in der Phase geschoben wird.

Wie aus Bild 19 hervorgeht, muß im Empfänger das I'-Signal von Zeile zu Zeile umgepolt werden (vergleiche Bild 17), d. h. die im Sender eingeführte Vorzeichen-Kommutierung, entsprechend der Änderung des Drehsinns im Farbkreis, muß im Empfänger wieder aufgehoben werden. Dies ist sehr einfach durch Umpolung des Zusatzträgers für den I'-Demodulator zu erreichen. Wegen der Modulation mit unterdrücktem Träger muß natürlich im Empfänger dieser Referenzträger auf jeden Fall wieder synchron zugesetzt werden. Seiner Umpolung für den I'-Kanal entspricht nach der Demodulation einer Umpolung des Signals I' in $-I'$.

Am besten bewähren sich Schaltungen, die keine aktiven Bauelemente, wie Röhren oder Transistoren, für die Summierung und Subtraktion gemäß dem in Bild 21 angegebenen Blockschema enthalten. Hierdurch ist eine absolute Stabilität der Schaltung über lange Zeiten hinweg sichergestellt. Die komplette, ausgeführte Schaltung kann aus dem Grundprinzip (s. *Bild 22a*) auf folgende Weise entwickelt werden: Summen- und Differenzsignal werden nach Bild 22*b* an je einer Widerstandsmatrix gebildet. Laufzeitleitungen und Matrix werden von einer Röhre in Katodenfolgerschaltung, in Transistorgeräten noch vorteilhafter von einem Emitterfolger (Basisschaltung), gesteuert. Der Ausgangswiderstand der Ultraschall-Verzögerungsleitung DL_1 liegt ebenso wie ihr Eingangswiderstand in der Größenordnung von 50 Ω. Daher ist es möglich, durch Aufwärtstransformation mit einem als Bandfilter ausgebildeten Transformator Tr_1 am Ausgang der Leitung ihren Spannungsverlust (etwa 16 dB) auszugleichen. Er entsteht durch die zweifache Wandlung und infolge der Dämpfung der Ultraschallwelle im Glas. An einem Ende der streng symmetrischen, bifilaren Sekundärwicklung von Tr_1 wird die eine, für den Summenkanal (Q') benötigte Spannung abgenommen. Am anderen Ende, genau um 180° phasenverschoben, entsteht dann die entsprechende Spannung für den Differenzkanal (I'). In dieser einfachen Schaltung wird der Eingang nicht vom Ausgang her beeinflußt, da eine Rückwirkung von einem Sekundärende des Transformators Tr_1 durch eine gleichgroße entgegengesetzter Polarität vom anderen Wicklungsende aufgehoben wird. Dies gilt auch für den umgekehrten Weg: Eine Störspannung, die über die eine Widerstandsmatrix das eine Ende der Transformator-Sekundärwicklung erreicht, wird von einer gleichgroßen über die zweite Widerstandsmatrix im Gegentakttransformator kompensiert.

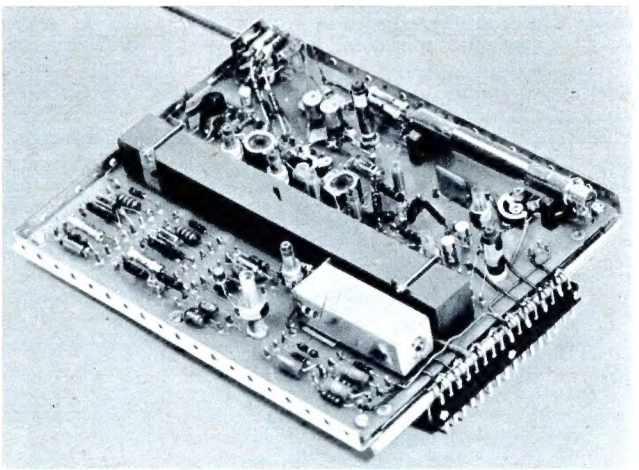


Bild 23. Adapter zum Umrüsten eines NTSC-Empfängers auf PAL-Empfang

An den beiden Widerstandsmatrixen werden die trägerfrequenten Signale F_Q' und F_I' gewonnen. Im Anschluß daran werden sie zu hochohmigen Synchron-Demodulatoren geleitet, die I' und Q' gleichgerichtet als Video-Signal liefern. Dem I'-Demodulator wird der Referenzträger zur Kommutierung von $-I'$ auf $+I'$ von Zeile zu Zeile in der Phase um 180° geschaltet zugeführt. Die Umschaltung selbst übernimmt ein von den Zeilenrücklaufimpulsen gesteuerter bistabiler Generator.

Bild 23 zeigt einen Adapter in Transistortechnik für die Umwandlung eines RCA-Farbfernseh-Empfängers CTC 15 oder 16 in einen umschaltbaren PAL-NTSC-Empfänger. Die eingegossene Laufzeitleitung (nach Bild 20) ist gut zu erkennen.

Ein einfacher PAL-Decoder ohne Laufzeitleitung

Zur Kompensation der Farbfehler wird bei dem PAL-Verfahren ein Speicher benötigt, der die Information einer Zeile auch noch während der nachfolgenden Zeile zur Verfügung stellt. Ähnlich wie dieser Speicher wirkt infolge seiner Trägheit auch das Sehsystem des Menschen. Jede Fernsehübertragung und schließlich auch der Film lebt von der Existenz dieser Speichereigenschaft. So werden z. B. vom Auge auch zwei nebeneinanderliegende Farbstreifen zu einer Mischfarbe vereinigt, wenn ihr Abstand nur genügend klein ist oder sie schnell und eng genug nacheinander geschrieben werden. Auf Grund dieser Tatsache ergibt sich die Möglichkeit, einen vereinfachten PAL-Empfänger zu bauen. Man braucht im wesentlichen nur den elektrischen Speicher wegzulassen, dann erscheinen die Farben der zeitlich aufeinanderfolgenden Zeilen auf dem Bildschirm komplementär verfälscht. Sie werden dann innerhalb bestimmter Grenzen vom Auge als unverfälschte Farben empfunden.

Ein solcher einfacher Empfänger braucht gegenüber NTSC als Mehraufwand nur einen elektronischen Schalter, der im Empfänger die Rückspiegelung des Farbzeigers vornimmt (*Bild 24*). Hierzu wird ein ähnlicher Diodenschalter wie im Modulator benutzt. Der Referenzträger wird hierbei einem bifilar gewickelten Gegentakt-Transformator entnommen, und seine beiden Ausgänge werden abwechselnd an den I'-Synchron-Demodulator gelegt. Die notwendige Umschaltspannung liefert ein bistabiler Generator, der von den Zeilenimpulsen gesteuert und zusätzlich von mitübertragenden Kennimpulsen synchronisiert wird. Die Umschaltung eines solchen Empfängers auf das NTSC-Verfahren ist sehr einfach möglich, da dazu der bistabile Generator nur auf einer Seite elektrisch festgehalten werden muß, wodurch die Umschaltung des Farbzeigers aufgehoben wird.

Sind bei diesem vereinfachten Verfahren die Phasenfehler kleiner als ca. 25°, so kommen die Vorzüge des PAL-Systems voll zur Geltung. Bei größeren Fehlern werden die unterschiedlich gefärbten Zeilen, die meist auch eine unterschiedliche Helligkeit aufweisen, jedoch zu sehen sein. Dabei sind die Farben Zyanblau und Gelb besonders empfindlich. Die hierbei unter Umständen sichtbar werdende Zeilenstruktur wandert wegen des Zeilensprungverfahrens langsam über den Bildschirm. Diese jalousieartige Erscheinung, vielfach auch als „Hannoverblinds" bezeichnet, kann auch als Abstimm-

anzeige benutzt werden, da sie bei richtiger Abstimmung am wenigsten zu sehen ist. Bei größerem Phasenfehler auf der Übertragungsstrecke werden die Farbfehler zwar kompensiert, aber die Streifen werden bei bestimmten Farben in Erscheinung treten; dann ist es immer noch möglich, eine optimale Abstimmung zu finden, die genau in der Mitte des Fehlerbereiches liegt, wobei die Streifen auf ein erträgliches Maß reduziert sind.

Im Rahmen dieser Arbeit kann natürlich nur auf das Grundprinzip des PAL-Systems eingegangen werden. Es haben sich aber bei der Verwirklichung der PAL-Grundidee eine Reihe vorteilhafte Anwendungsmöglichkeiten ergeben, von denen wenigstens eine genannt werden soll.

So kann beispielsweise unter anderem der Referenzträger direkt aus dem Farbsignal entnommen werden, wodurch die Wiedergabe von auf Magnetband aufgezeichneten Farbbildern wesentlich erleichtert wird und gleichzeitig der relativ teuere Quarz im Empfänger eingespart werden kann (Einzelheiten hierüber können in Sonderveröffentlichungen nachgelesen werden [4, 7].

Außerdem hat sich gezeigt, daß bei PAL auf die speziellen Farbdifferenzsignale I' und Q' verzichtet werden könnte. Sie wurden aber trotzdem für PAL übernommen, da mit ihnen PAL-Empfänger leichter auf NTSC umgeschaltet werden können, bzw. sehr einfach von PAL in NTSC umcodiert werden kann. Man könnte auch von den zwei einfacher zu matrixierenden Signalen $R' - Y'$ und $B' - Y'$ ausgehen, die dann mit gleicher Bandbreite zu übertragen sind, denn Farbübersprechen während der Farbübergänge, sogenannte „Quadraturfehler", die bei NTSC entstehen können, gibt es bei PAL nicht. Die Umschaltung des Drehsinns des Farbkreises bedeutet nämlich physikalisch auch eine Umschaltung des Drehsinns der Seitenbänder. Dies hat zur Folge, daß das abgeschnittene oder begrenzte Seitenband in jeder zweiten Zeile im Empfänger mit dem verzerrten vertauscht wird. Durch die Mittelung über zwei Zeilen arbeitet der Empfänger dann genau so, als würden ihm zwei komplette Seitenbänder zugeführt, die lediglich etwas verminderte Energie haben. Ein Farbübersprechen ist deshalb nicht möglich. Diese Unempfindlichkeit des Systems gegen Seitenbandfehler ist nicht nur von Vorteil bei abnormalen Ausbreitungsbedingungen, sie macht auch die Durchlaßkurve des Farb- und des Zf-Verstärkers unkritisch.

Der Zusammenhang zwischen Farbträger und Zeilenfrequenz muß bei PAL etwas anders gewählt werden als bei NTSC. Das hängt mit der Phasenumschaltung in jeder zweiten Zeile zusammen. Bei PAL wird der Farbträger gleich einem ungeraden Vielfachen von $^1/_4$ der Zeilenfrequenz gewählt (sog. „Viertelzeilenoffset"). Außerdem wird noch ein Kunstgriff benutzt, der die Sichtbarkeit der „Perlenschnüre" herabsetzt. Es wird eine Verschiebung um $^1/_2$ Rasterpunkt pro Bild noch zusätzlich eingeführt (25 Hz Versatz), vgl. [5]. Auch bei PAL liegen die Spektrallinien der Farbe zwischen denen der Leuchtdichte wie bei NTSC, allerdings nicht genau in der Mitte. Eine nachträgliche Trennung für eine Ummodulation ohne gegenseitige Beeinflussung von Leuchtdichte und Farbe ist daher bei den beiden eng miteinander verwandten Systemen möglich.

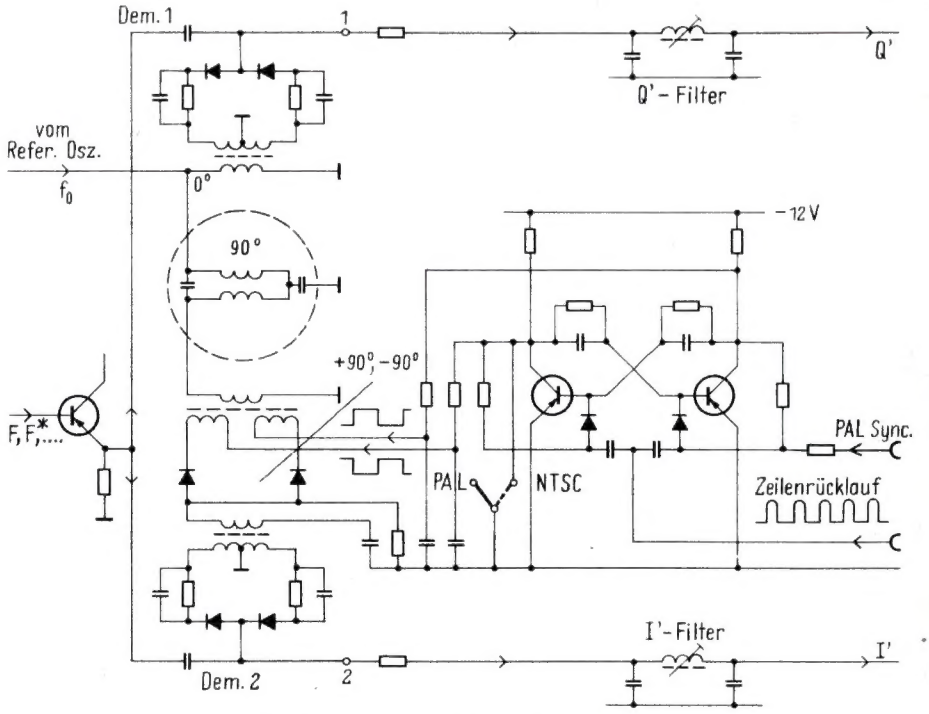


Bild 24. Decoder für vereinfachtes PAL-System

Farbtafel II. Magnetband-Aufzeichnungen

Wiedergabe von auf Magnetband aufgezeichneten Bildern in PAL

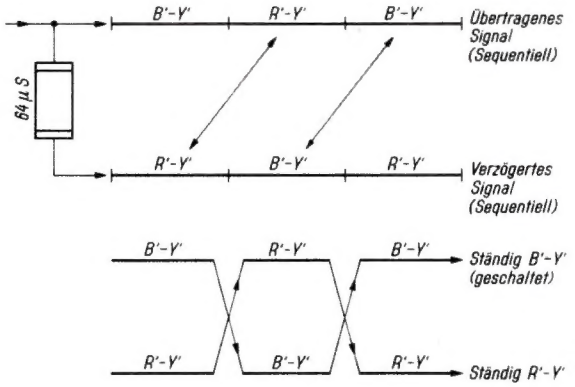


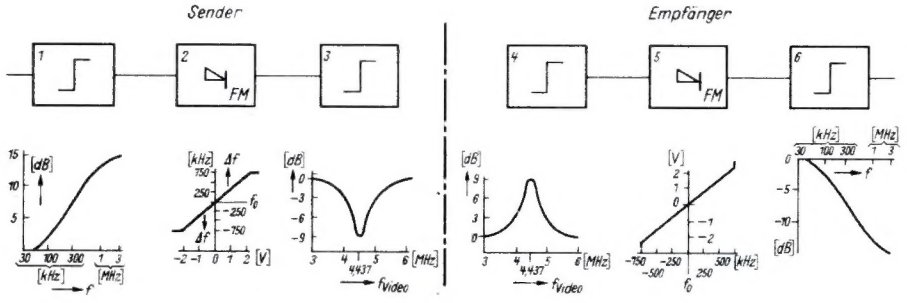
Bild 25. Sequentielle Übertragung der Farbdifferenzsignale (R' – Y'), (B' – Y') bei Secam und Gewinnung der Kanäle B' – Y' und R' – Y' nach Verzögerung und kreuzweiser Umschaltung

Grundprinzip des Secam-Farbfernseh-Systems

Der Farbzeiger F kann auch durch zwei Koordinaten definiert werden, die *nacheinander* übertragen werden, wenn durch einen Speicher dafür gesorgt wird, daß sie im Empfänger gleichzeitig anwesend sind. Ausgehend von dem schon erwähnten Gedanken, daß sich die Information zweier aufeinanderfolgender Zeilen nicht wesentlich unterscheidet, hat noch vor der Entwicklung des PAL-Verfahrens H. de France den Gedanken gehabt, jeweils nur eine Farbinformation in einer Zeile zu übertragen, z. B. (B' – Y') und die andere in der nächsten Zeile, z. B. R' – Y'. Die gerade nicht übertragene Information bzw. Koordinate des Farbzeigers F wird einem Speicher (Verzögerungsleitung), der die Information der vorhergehenden Zeile genau um die Dauer einer Zeile verzögert, entnommen. Es wird also während jeder Zeile die Übertragung einer Information eingespart und damit die komplizierte Doppelmodulation vermieden. Die logische Abwandlung des NTSC-Systems macht den ersten Schritt der Mittelung zweier Zeilen zum PAL und dann den nächsten Schritt der Mittelung von zwei einzelnen Farbinformationen von zwei Zeilen zu Secam. Die Übertragung einer Farbe erfordert beim sequentiellen System die Zusammenfassung zweier Zeilen (*Bild 25*).

Der Farbträger wird also bei Secam während jeder Zeile nur mit einem Farbdifferenzsignal moduliert, daher kann Frequenzmodulation gewählt werden. Damit ist eine von Übertragungsfehlern weitgehend unabhängige Übertragungsform für jede Farbart gewonnen worden. Bei der normalen Frequenzmodulation wäre aber im Gegensatz zum NTSC-System der Träger auch bei wenig gesättigten Farben immer in voller Größe vorhanden und als Folge der Frequenzmodulation noch bevorzugt sichtbar. Durch eine Reihe von zusätzlichen Maßnahmen ist es gelungen, die Sichtbarkeit des Farbträgers im Schwarzweiß-Empfänger auch bei der Frequenzmodulation so klein wie beim NTSC-System zu halten. Eine bei verminderter Farbsättigung entsprechend verkleinerte Farbträgeramplitude wird bei der Frequenzmodulation durch eine Art zusätzlicher Amplituden-Modulation erreicht. Diese geschieht dadurch, daß ein auf der Mittenfrequenz des frequenzmodulierten Trägers liegender Absorptionskreis bei kleiner Farbsättigung die Trägeramplitude so weit vermindert, daß sie im Schwarzweiß-Bild nur noch wenig sichtbar ist. Sie verschwindet allerdings bei farblosem Bild im Gegensatz zu NTSC und PAL nicht ganz. Die Kompatibilität ist aber trotzdem etwa gleich der des NTSC-Systems. Eine frequenzabhängige Vorverzerrung der modulierenden Signale und eine entgegengesetzte frequenzabhängige Entzerrung nach der Demodulation helfen, die Systemeigenschaften weiter zu verbessern.

Bild 26 zeigt eine Zusammenstellung der wesentlichen Parameter des Secam-Systems. Dazu gehört noch die nicht im Bilde angedeutete, für gute Kompatibilität wichtige Synchronisierung des FM-Trägers zur Zeile und eine Gegenkopplung zur Beseitigung des Übersprechens vom Leuchtdichtekanal in den Farbkanal. *Bild 27* stellt vereinfacht das Prinzip des Coders mit seinem Umschalter und *Bild 28* die Umschaltung im Decoder dar. Als Schalter werden Diodenumschalter in Brückenschaltung verwendet. Es ist ein doppelpoliger Umschalter für ein relativ breitbandiges Signal (ca. 1 MHz) erforderlich.


Sender
Empfänger
FM
FM
[dB]
[kHz]
Δf
[dB]
[V]
[kHz]
[MHz]
[dB]
[dB]
[V]
[kHz]
[MHz]
[dB]
[kHz]
[MHz]
f
f
f

Die zwei Farbdifferenzsignale, die den Farbzeiger definieren, werden bei NTSC *gleichzeitig* in sogenannter „Quadraturmodulation" auf einen Träger moduliert, und es entsteht eine kombinierte Phasen- und Amplitudenmodulation. Zur Definition des Nullphasenwinkels, oder mit anderen Worten, zur richtigen Wiedergewinnung der Koordinaten I' und Q' im Empfänger ist ein Referenzträger zu übertragen, wozu der sogenannte „Burst" notwendig ist. Das System ist empfindlich gegen Phasenfehler.

Bei PAL wird die Modulationsart von NTSC beibehalten, also ebenfalls mit Doppelmodulation gearbeitet. Zusätzlich wird die Korrelation der benachbarten Zeilen angewandt und durch ein neues Verfahren, einen Wechsel des Farbzeiger-Drehsinnes von Zeile zu Zeile (Phase Alternation Line), eine Kompensationsmöglichkeit für die Übertragungsfehler geschaffen. Dazu werden die Informationen zweier Zeilen zu einem *fehlerkompensierten Mittelwert* vereinigt, d. h. für die Übertragung jeder augenblicklichen Farbart werden vier Informationen aus zwei Zeilen benutzt (*Bild 29a*). Die Mittelung geschieht nur im Empfänger. Die Farbinformationen zweier Zeilen werden dabei in einem zulässigen, im Bilde nicht bemerkbaren Ausmaß verwischt (die Schärfe des Bildes wird vornehmlich durch die Leuchtinformation bestimmt). Die Übertragung selbst wird mit *voller Information* durchgeführt. Im ausgestrahlten Signal wird also keine Information eingespart, sondern sozusagen durch die sequentielle I'-Umschaltung sogar noch eine zusätzliche codierte Nachricht mitübertragen.

Das Secam-System überträgt in jeder Zeile nur eine Koordinate des Farbzeigers; dafür wird aus der nächsten Zeile die andere genommen. Hier wird also wechselseitig schon bei der Sendung auf eine Information verzichtet (Bild 29b), ein – wie sich herausgestellt hat – für normale Bilder durchaus zulässiger Prozeß. Die Doppelmodulation vermeidet man dadurch, und man kann jetzt Frequenzmodulation nehmen. Diese Modulationsart ist gegen Phasenfehler fast unempfindlich. Allerdings erlaubt die Einsparung schon bei der ersten Codierung keine spätere Wiederherstellung der vollen Information mehr.

Wegen der Frequenzmodulation erfordert Secam bei der Mischung und Überblendung eine Demodulation und Neumodulation. Das gilt auch für den Übergang – die Transcodierung – von Secam in ein anderes System, während NTSC und PAL einfach und ohne Neumodulation ineinander umgewandelt werden können. Sowohl Secam als auch PAL, letzteres speziell mit dem vom Signal abgeleiteten Träger, erlauben eine stabilere und bessere Farbwiedergabe vom Magnetband als NTSC.

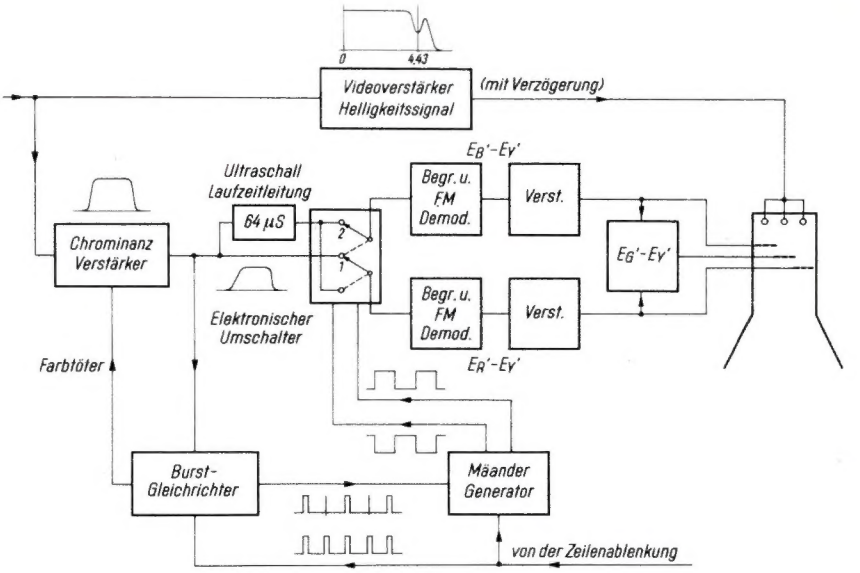


Bild 28. Grundprinzip eines Secam-Decoders; zur Vereinfachung sind die Einrichtungen zur zusätzlichen frequenzabhängigen Amplitudenkorrektur nicht gezeichnet

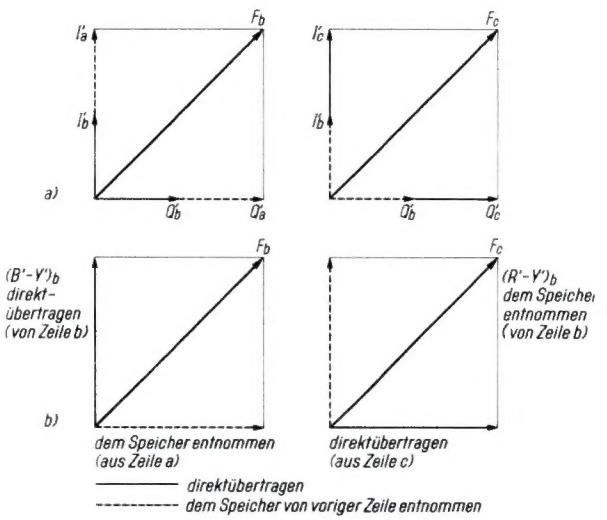


Bild 29. Signalzusammensetzung bei PAL und Secam: a) Bei PAL werden insgesamt vier Informationen ausgewertet, je zwei aus zeitlich aufeinander folgenden Zeilen. b) Secam wertet die Informationen aus, die wechselweise in zeitlich aufeinander folgenden Zeilen verfügbar sind

Literatur

NTSC

[1] *D. G. Fink:* Color Television Standards. NTSC. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1955; dort weitere Literaturangaben.

[2] *P. S. Carnt, G. B. Townsend:* Colour Television. Iliffe-Books Ltd., London 1961.

PAL

[3] *W. Bruch:* Farbfernsehsysteme – Überblick über das NTSC-, Secam- und PAL-System, Telefunken-Zeitung, Jg. 36 (1963), H. 1/2, S. 70...88.

[4] *W. Bruch:* Das PAL-Farbfernsehsystem. Prinzipielle Grundlagen der Modulation und Demodulation, Nachrichtentechn. Zeitschrift, Jg. 17 (1964), H. 3, S. 109...121.

[5] *W. Bruch:* Wahl eines Präzisionsoffsets für den Farbhilfsträger im PAL-Farbfernsehsystem, Telefunken-Zeitung, Jg. 36 (1963), H. 1/2, S. 89...99.

[6] *W. Bruch:* Demodulationsschaltung für PAL-Farbfernsehempfänger, Telefunken-Zeitung, Jg. 37 (1964), H. 1, S. 62...73.

[7] *W. Bruch:* Neue Methoden der Referenzträgersynchronisierung im PAL-Farbfernsehempfänger, Telefunken-Zeitung, Jg. 37 (1964), H. 2, S. 100...115.

[8] *W. Bruch:* Transcoder PAL-NTSC – Die Umwandlung eines PAL-Signals in ein NTSC-Signal und die Umkehrung NTSC in PAL, Telefunken-Zeitung, Jg. 37 (1964), H. 2, S. 115...135.

Secam

[9] *H. de France:* Le systeme de television en couleurs sequentielle simultane. L'onde Electrique 38 (1958), S. 479...483.

[10] *H. de France, P. Cassagne, G. Melchior:* Characteristics of the SECAM Television System, Electronic Engineering Vol. 35 (1963), S. 578...581.

[11] *P. Cassagne:* Neuere Verbesserungen beim Secam-Farbfernsehsystem, Radio Mentor 28 (1962), S. 833...834.

[12] *G. Melchior, C. Ragot:* The SECAM Decoder, Electronic Engineering Vol. 35 (1963), S. 642...650.

TELEFUNKEN

Vordergrund - Hintergrund

Wir sprechen oft von unseren Erzeugnissen, die Sie kaufen können. Von nachrichtentechnischen Anlagen und Transistorempfängern, von Bauelementen und elektronischen Rechnern. So kennen Sie uns - so ist der Vordergrund des Unternehmens.

Aber nur selten erwähnen wir, daß im Hintergrund Techniker und Wissenschaftler tätig sind. Hinter den Türen der Entwicklungslabors stimmt kein Abreißkalender mehr: Dort arbeitet man an den Problemen von morgen.

Telefunken-Erfahrung können Sie kaufen.